

Indicadores edáficos de la calidad de suelos con trigo bajo siembra directa en el sudoeste bonaerense

Soil quality indicators for wheat under no-tillage in the southwest of Buenos Aires province

MARTINEZ, Juan Manuel; GALANTINI, Juan A.; DUVAL, Matías E.; LÓPEZ Fernando M.

jmmartinez@criba.edu.ar

Resumen

En la actualidad, resulta necesario contar con información científica que permita seleccionar indicadores de calidad de suelos (CS) en el sudoeste bonaerense (SOB). El objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes indicadores químicos, físicos y biológicos de la calidad de suelos que permitan maximizar la productividad del trigo (*Triticum aestivum* L.) y determinar cuáles son los más importantes en suelos bajo siembra directa (SD) del SOB. Durante los años 2010 y 2011 se muestrearon 57 lotes de productores en 0-20 cm con trigo bajo SD, situados en la región semiárida (RSA) y subhúmeda (RSH) bonaerense. Se utilizaron componentes principales (CP) con indicadores químicos, físicos y biológicos; en función del rendimiento en grano. El análisis de CP explicó un 75 y 87% de la variabilidad total del rendimiento de trigo para RSA y RSH, respectivamente. En RSA, las variables más importantes seleccionadas fueron COT, Nt, COPf, CHt y CHs para CP1; N-MOP en CP2; Pe y Npm en CP3. Para RSH, las variables más importantes seleccionadas como indicadores de calidad fueron Pe para CP1; COPg en CP2, pH en CP3 y CHt en CP4. En RSA, las fracciones más lábiles del C y sensibles resultaron indicadores de gran importancia por la variabilidad en los aportes de fracciones lábiles por los residuos de cultivos en esta región. En RSH, el rendimiento de trigo estuvo mayormente explicado por un menor número de variables, sin embargo, no tuvieron importancia las fracciones lábiles en el rendimiento.

Palabras Clave: Calidad de suelos-Fracciones orgánicas- Región semiárida y subhúmeda

Introduction

Actualmente resulta necesario contar con información científica que permita seleccionar indicadores adecuados que permitan desarrollar índices a fin de evaluar correctamente la calidad de los suelos (CS) (Duval *et al.*, 2013). La CS se define como la capacidad para funcionar dentro de ciertos límites del ecosistema (Toledo *et al.*, 2013), sustentar la productividad biológica, mantener la calidad del agua y del aire, además de promover la salud de plantas, animales y humanos (Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997). Con respecto al nivel productivo, una deseable calidad de suelos se refiere a una alta productividad sin degradación del suelo o el ambiente (Govaerts *et al.*, 2006). En los suelos agrícolas la calidad estará dada por su potencial para permitir el desarrollo de los cultivos, sin causar degradación del suelo ni deteriorar el ambiente. Las propiedades físicas, químicas y biológicas pueden ser buenos indicadores de CS aunque la mayoría no son universales, y son variables con el ambiente y características edáficas bióticas y abióticas (Shukla *et al.*, 2005). Los indicadores de CS más efectivos probablemente varían acorde a la región, clima y sistema de producción (Parr *et al.*, 1992). Sin embargo, debido a la imposibilidad de considerar todas estas propiedades juntas, es necesario hacer una selección de los indicadores más importantes. En tal sentido, la materia orgánica del suelo (MO), principalmente, sus fracciones más lábiles, como la MO particulada (MOP) y los

Summary

Currently, it is necessary to have scientific information for selecting soil quality (SQ) indicators in the southwest of Buenos Aires. The aim of this work was to assess chemical, physical and biological SQ indicators that maximize wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, and to determine which are the most important in soils under no tillage in the southwest of Buenos Aires Pampas. In 2010 and 2011, 57 farmer fields sown with wheat under no tillage and located in the semiarid region (RAS) and sub-humid (RSH) region, were sampled at 0-20 cm. The principal component analysis (PC) was used to detect indicators that affected wheat yield, using chemical, physical and biological indicators. The CP analysis explained 75 and 87% of the total wheat yield variability for RAS and RSH, respectively. In RAS, the most important variables were COT, Nt, COPf, CHt and CHs from CP1; N-MOP from CP2; Pe and Npm from CP3. For RSH, the most important variables selected as indicators were: Pe from CP1; COPg from CP2, pH from CP3 and CHt in CP4. In RAS, the more labile C fractions were sensitive indicators of great importance due to the high variability in the contributions of soil labile fractions from crop residues. In RSH, wheat yield was largely explained by a smaller number of variables; however, the labile soil organic fractions had no influence on yield.

Keywords: Soil quality- Soil organic fractions- Semiarid and subhumid region

carbohidratos- se consideran importantes indicadores tempranos de la CS y de la sustentabilidad (Reeves, 1997; Fabrizzi *et al.*, 2003; Duval *et al.*, 2013).

La MO es una propiedad relativamente sencilla de medir y al mismo tiempo, se puede caracterizar de muchas maneras diferentes. Gregorich *et al.* (1994) y Bolinder *et al.* (1999) han sugerido que la MO puede ser apropiada para evaluar cambios en CS pero además hay que considerar otra serie de propiedades relacionadas que podrían llegar a estar más estrechamente vinculadas con funciones específicas que modifican la CS. Dichos autores sugieren incluir, al carbono orgánico (CO) particulado (COP), fracciones livianas de N, carbono y nitrógeno (N) mineralizable, biomasa microbiana, carbohidratos y enzimas del suelo.

Diferentes autores han definido una serie de requisitos o pautas específicas que deben cumplir los parámetros evaluados para ser considerados indicadores. Según Dalal (1998) supone que un buen indicador debe medir una o más funciones del suelo; ser lo suficientemente sensible para reflejar los cambios debidos a perturbación, restauración o manejo; facilitar la referencia de valores críticos o umbrales; ser fácilmente interpretables; ser fácil y económico de obtener.

El cultivo de trigo es la base de los sistemas productivos en una amplia región del Sudoeste bonaerense (Martínez *et al.*, 2012). Sus rendimientos son influenciados por las condiciones climáticas y las propiedades edáficas, obligando a un uso eficiente de los recursos (Galantini *et al.*, 2004). En las regiones semiáridas y subhúmedas, la principal limitante productiva es la disponibilidad de agua debido a la variabilidad de las precipitaciones. Además, la intensificación de la agricultura en los últimos años ha ido en detrimento del contenido de MO (Sainz Rozas *et al.*, 2011), afectando aún más los factores de producción. En estos casos, es necesario conocer cuáles son las propiedades edáficas tendientes a maximizar la producción, logrando una mayor sustentabilidad de los sistemas.

Debido a que muchas de las propiedades edáficas que contribuyen a explicar el rendimiento del cultivo se encuentran altamente correlacionadas, es necesario llevar a cabo una evaluación mediante métodos estadísticos que consideren todas estas variables simultáneamente y la correlación entre ellas (Bredja *et al.*, 2000; Landriscini *et al.*, 2015), permitiendo establecer cuáles son aquellas propiedades que maximizan el rendimiento. El análisis de componentes principales (CP) construye nuevas variables no correlacionadas o componentes principales, basándose en la

matriz de correlación. Esta técnica examina todos los datos en un espacio de menor dimensión al espacio original de las variables, identificando las propiedades más sensibles en los tratamientos estudiados. Se construyen ejes artificiales llamados CP, que permiten obtener gráficos de dispersión de observaciones y/o variables no correlacionadas, con propiedades óptimas para la interpretación de la variabilidad y covariabilidad subyacente (Balzarini *et al.*, 2008).

La CS ha cobrado relevancia en los últimos años debido a problemas ambientales relacionados con la degradación del suelo y la sostenibilidad de la producción bajo diferentes sistemas de cultivo (Toledo *et al.*, 2013). Sin embargo, no existe información sobre cómo afectan los indicadores de la calidad de suelo a los rendimientos de trigo en regiones con limitaciones hídricas. En el SOB donde los recursos- como el agua disponible - son limitados, se desconocen en detalle cuáles son los indicadores que permitan observar el efecto de la agriculturización y de la SD sobre la productividad de estos suelos. El objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes indicadores químicos, físicos y biológicos de la CS asociados a la productividad del trigo y determinar cuáles son los más importantes en suelos bajo SD el SOB.

Materiales y Métodos

Durante las campañas 2010/2011 y 2011/2012 se muestrearon 57 lotes -de aproximadamente 50 hectáreas- de productores destinados al cultivo de trigo bajo SD, situados en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, en lo que comprende la región semiárida y subhúmeda bonaerense (Figura 1). Las características de los sitios y lotes se detallan en la Tabla 1. Los suelos se muestrearon en el espesor de 0-20 cm al momento de la siembra del cultivo en tres puntos georeferenciados en un radio de 50 m, en cada uno de los lotes. En cada punto de muestreo se tomó una muestra de suelo compuesta por 15-20 submuestras.

Muestreo de biomasa vegetal

El muestreo de biomasa aérea al momento de madurez fisiológica (Z90, Zadoks *et al.*, 1973) se realizó en los mismos puntos georeferenciados que los suelos. El procedimiento consistió en tomar 2 submuestras de material vegetal (biomasa total aérea, MS) de 2 m lineales en cada uno de los tres puntos. Se determinó MS y la concentración de N en grano y paja mediante Kjeldahl (Bremner, 1996), a partir del cual se estimó la cantidad total de N absorbida (Nabs) por la biomasa aérea de los cultivos (kg N ha^{-1}).

Se asumió la misma necesidad teórica de agua del trigo para ambos años, de acuerdo a lo calculado por Paoloni & Vázquez (1985) que realizaron su estudio en la zona de influencia de este trabajo. Estos autores estimaron la necesidad a partir de la evapotranspiración potencial del trigo obtenida mediante la fórmula de Blaney & Criddle, adaptada por la Food and Agriculture Organization (FAO).

Indicadores químicos, físicos y biológicos

Los indicadores químicos, físicos y biológicos evaluados fueron seleccionados para reflejar las particularidades de las regiones utilizadas. Se consideraron como indicadores a todos aquellos factores que limitan la productividad del cultivo en la región determinada, tal como lo realizado por Goevarts *et al.* (2006). Las muestras de suelo se secaron al aire y se tamizaron por 2 mm. Luego, se evaluaron indicadores químicos, físicos y biológicos de acuerdo a la clasificación de Doran & Parkin (1994). Como indicadores químicos: carbono orgánico total (COT) por combustión seca con analizador automático Leco C analyzer (Leco Corporation, St Joseph, MI), N total (Nt) del suelo (Bremner & Mulvaney,

Figura 1. Ubicación de los sitios seleccionados en el Sudoeste bonaerense. Las regiones climáticas dentro de la isohieta de 600-700 mm y 700-800 mm fueron clasificadas como semiárida (RSA) y subhúmeda (RSH), respectivamente.

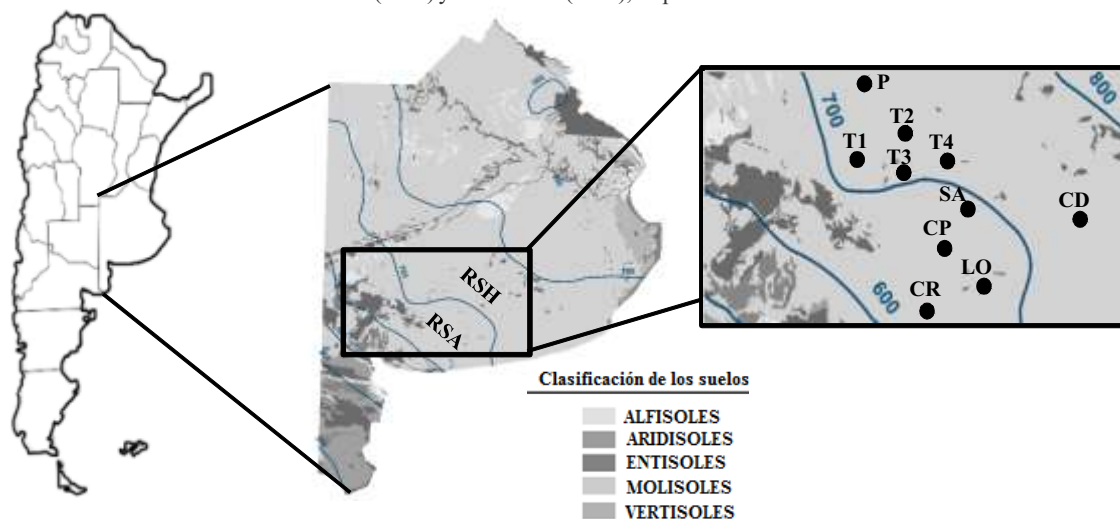


Tabla 1. Características generales y climáticas de los sitios seleccionados.

Región	Sitio	n	Clasificación Taxonómica	Cultivo antecesor	Temperatura			Pp.	
					media	máx	mín	Anual	Ciclo
				%		°C		mm	
RSA	Las Oscuras (LO)	17	Argiustol Típico	Trigo (60); Arveja (20); Maíz (20)	15	21	9	669	317
	Cnel. Rosales (CR)	4	Haplustol Entico	Cebada (100)	15	21	9	664	285
	Cnel. Pringles (CP)	3	Haplustol Típico	Trigo (60); Cebada (20); Mijo (20)	15	21	8	686	331
	Saldungaray (SA)	12	Argiustol Típico	Trigo (67); Girasol (25); Campo natural (8)	15	21	8	694	307
	Cnel. Dorrego (CD)	4	Argiudol Típico	Cebada (100)	15	21	8	726	354
RSH	Tornquist 1 (T1)	7	Argiudol Típico	Girasol (57); Trigo (28); Soja (15)	14	21	8	740	417
	Tornquist 2 (T2)	4	Argiudol Típico	Girasol (50); Cebada (50)	14	21	8	756	388
	Tornquist 3 (T3)	1	Argiudol Típico	Campo natural (100)	14	21	8	741	497
	Tornquist 4 (T4)	1	Argiudol Típico	Girasol (100)	14	21	8	753	535
	Pigüé (PI)	4	Argiudol	Soja (100)	13	20	7	796	464

n, número de lotes por sitio. Cultivo antecesor, % de cada cultivo antecesor en paréntesis en los n lotes por sitio; Pp. Precipitaciones.

Ciclo, precipitaciones durante el ciclo del trigo.

RSA, región semiárida; RSH, región subhúmeda. Cebada, *Hordeum vulgare* L.; Girasol, *Helianthus annuus*; Soja, *Glycine max* L. Merr.; Mijo, *Panicum miliaceum* L.

1982), pH y fósforo extraíble (Pe, Bray & Kurtz, 1949). Con respecto a los indicadores físicos se analizó el almacenamiento de agua la siembra (AS) y condición textural estimada por tamaño de partículas por fraccionamiento físico del suelo (Duval *et al.*, 2013), obteniendo las fracciones: arenas y limo + arcilla. Como indicadores biológicos se evaluó: N potencialmente mineralizable medido como N anaeróbico (Nan) (Waring & Bremner, 1964), carbono orgánico particulado grueso (COPg, > 100 micrones) y particulado fino (COPf, < 53 micrones) (Duval *et al.*, 2013), N en la MOP (Wilson *et al.*, 2001) e hidratos de C totales y solubles (CHt y CHs) (Puget *et al.*, 1999).

Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó considerando la región a la cual pertenecen los sitios (RSA y RSH, semiárida y subhúmeda, respectivamente). Se realizaron pruebas “t” de comparación de

medias para el rendimiento de trigo y el N absorbido en Z90 según la región climática. Se llevaron a cabo regresiones lineales simples entre el rendimiento en grano del trigo y el Nabs en Z90. Se realizó el análisis de componentes principales (CP) utilizando a todos los indicadores químicos, físicos y biológicos como variables; y al rendimiento en grano como variable de predicción. Se estandarizaron los datos según la matriz de correlación. Se seleccionaron todos los CP > 1 y dentro de cada uno se seleccionó a las variables con los mayores autovectores y aquellas en que la distancia con era hasta un 10% con respecto a la más elevada (Li *et al.*, 2013). Se realizaron árboles de regresión con el rendimiento en trigo como variable independiente y los CP generados para cada región como variables regresoras para evaluar cuál de estos produce la combinación de mayores y menores rendimientos de trigo. El análisis estadístico se realizó con el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

Resultados y Discusión

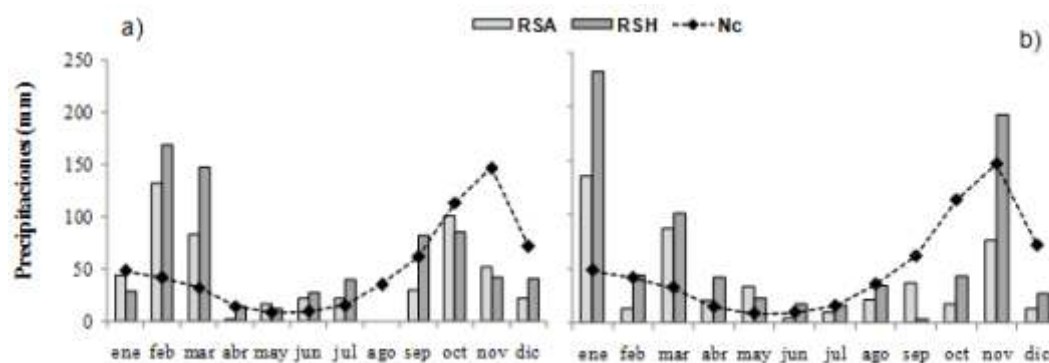
Condiciones climáticas

A nivel general, las precipitaciones en RSA y RSH para ambos años demostraron momentos de déficits durante el ciclo del cultivo (Figura 2), teniendo en cuenta la necesidad teórica del trigo propuesta por Paoloni & Vazquez (1985). Especialmente, los periodos de sequía se produjeron en estadios avanzados del cultivo (setiembre-octubre-noviembre), a excepción de lo ocurrido en RSH en 2011. Estas sequías durante estadios avanzados ya fueron reportadas por Martínez *et al.* (2015a y b) para suelos de la región.

Estos resultados demuestran la necesidad de conocer cuáles son los mejores indicadores edáficos asociados al rendimiento del trigo, debido a que esta característica climática se repite en la mayoría de los años.

Rendimientos del cultivo y N absorbido

Los rendimientos obtenidos no difirieron estadísticamente entre las regiones estudiadas ($p=0,0957$). Sin embargo, el coeficiente de variación de RSA fue inferior al de RSH (Tabla 2). Los mayores

Figura 2. Precipitaciones mensuales según región (RSA y RSH) para a) 2010 y b) 2011 y necesidad teórica del trigo en la región (Nc).**Tabla 2.** Rendimientos promedios de trigo y N absorbido por el cultivo en Z90 según región climática.

Variable	Región	Media		DS	mínimo	máximo	CV
		<i>n</i>	(kg ha ⁻¹)				
Rendimiento ^{ns}	RSA	36	2213	763	916	3990	35
	RSH	21	2730	1246	1032	6472	46
N absorbido por la planta ^{ns}	RSA	36	78,4	26,6	31,0	135	34
	RSH	21	82,9	34,5	42,0	182	42

RSA, región semiárida; RSH, región subhúmeda. *n*, número de datos por ambiente; DS, desvío estándar; CV, coeficiente de variación (%).
^{ns}: no significativo; (*): $p \leq 0,05$; (**): $p \leq 0,01$; (***): $p \leq 0,001$.

rendimientos promedios (datos no mostrados) se hallaron en PI (4.534 kg ha⁻¹) y los menores en SA (1.821 kg ha⁻¹). Con respecto, al N absorbido por el cultivo en Z90, al igual que con el rendimiento no se hallaron diferencias significativas entre las regiones consideradas ($p=0,5838$). Se observó la misma tendencia con respecto al coeficiente de variación (CV) hallada en el rendimiento, es decir, mayores CV en RSH (Tabla 2). Los mayores valores de N absorbido por el cultivo se obtuvieron en PI (127,2 kg ha⁻¹) y los menores en CD (63,2 kg ha⁻¹).

Se hallaron relaciones altamente significativas ($p < 0,001$) entre el rendimiento de trigo y el N absorbido en Z90 en ambas regiones (Figura 3). Estas relaciones entre el rendimiento y el N absorbido halladas en este estudio, difiere a lo informado por otros autores (Martínez *et al.*, 2015b). Estos, trabajando en suelos de la misma región, hallaron relaciones deficientes entre rendimiento y N absorbido, debido al déficit hídrico durante el período crítico del cultivo. Es frecuente en ambientes con limitaciones hídricas, que la asociación entre el rendimiento del cultivo y el N absorbido sea baja, debido a que el faltante de agua se produce en el momento de máximos requerimientos por parte del cultivo (McDonald, 1989), o sea, durante el llenado de granos (Martínez *et al.*, 2015a y b). Esto demostraría que el rendimiento de trigo sería una medida certera para evaluar los indicadores de calidad edáficos, a pesar de los déficits hídricos verificados durante el ciclo del cultivo en ambas regiones y años (Figura 2).

Indicadores químicos, físicos y biológicos

Los resultados de todos los indicadores evaluados se detallan en la Tabla 1. El nivel de MO de los suelos estudiados fue muy amplio, encontrándose dentro del rango 12 a 59 g kg⁻¹. El pH fue de ligeramente ácido a ligeramente alcalino (5,7- 7,9), condición típica de los suelos de la región (Landriscini *et al.*, 2015). La concentración promedio de Pe de los suelos fue de 14,1 mg kg⁻¹, con variaciones amplias en el rango de 1 a 44 mg kg⁻¹. Ron & Loewy (1990) informaron de un umbral de 10 mg kg⁻¹ para suelos de esta región, sin

embargo, estos autores realizaron el análisis en otra profundidad y en un sistema de labranza diferente. Granulométricamente, el contenido de arenas osciló entre 248,8 y 816,9 g kg⁻¹. Estos resultados indican una gran variabilidad de las propiedades edáficas de estos suelos.

Con respecto a la región climática, se hallaron valores superiores en todos los indicadores en los suelos de RSH. Se compararon estadísticamente todos los indicadores según su región climática, pero sólo se obtuvieron diferencias altamente significativas ($p < 0,001$) en pH y COPf para RSA y RSH.

El análisis de CP permitió explicar un 75 y 87% de la variabilidad total en el rendimiento de trigo (Tabla 4) para RSA y RSH, respectivamente. Para RSA los CP con autovalores > 1 fueron 3, mientras que en RSH fueron 4. En RSA, las variables más importantes seleccionadas fueron COT, Nt, COPf, CHt y CHs para CP1; N-MOP en CP2; Pe y Npm en CP3. Para RSH, las variables más importantes seleccionadas como indicadores de calidad fue Pe para CP1; COPg en CP2, pH en CP3 y CHt en CP4. La selección de 4 CP con autovalores > 1 en RSH, es dada por la elevada variabilidad de las propiedades químicas físicas y biológicas en los diferentes lotes evaluados (Li *et al.*, 2013). Esto se adiciona a la variabilidad obtenida en los rendimientos de trigo, característica de estas regiones con limitaciones climáticas. A pesar de esto se halló en cada CP generado un menor número de variables altamente relacionadas entre sí (Tabla 4).

Para RSA, se observó la gran importancia de todas las fracciones orgánicas de C, tanto totales como las lábiles, como así también del Nt demostrando la importancia como indicadores de calidad. En estas regiones debido a la variabilidad en la frecuencia de las precipitaciones, existen aportes variables de C lábil proveniente de los residuos de cultivos y son generalmente escasos. Esta situación junto a las limitantes hídricas modifica el ciclado de C en los suelos. En cambio, para los suelos de RSH no se detectaron a las

Tabla 3. Indicadores químicos, físicos y biológicos determinados según sitio y región climática.

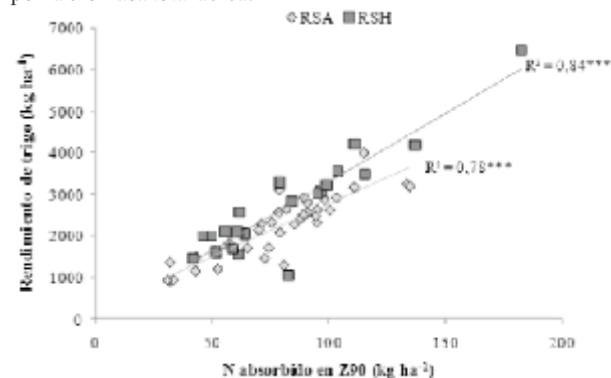
Sitio	n	Químicos				Físicos			Biológicos				
		COT	Nt	pH	Pe	AS	Arenas	limo+arcilla	COPg	COPf	Npm	CHt	CHs
		(g kg ⁻¹)			(mg kg ⁻¹)	(mm)	(g kg ⁻¹)		(g kg ⁻¹)				(mg kg ⁻¹)
LO	17	13,9	1,3	6,0	14,7	46,6	550	426	0,82	1,16	30,2	4955	571
CR	4	9,3	1,0	6,1	13,4	26,9	683	301	0,91	0,65	16,6	5053	450
CP	3	14,3	1,3	6,5	2,7	57,0	412	563	0,65	2,01	42,9	5926	703
SA	12	21,3	1,9	7,1	12,8	49,6	421	543	1,51	3,37	47,4	6753	752
CD	4	16,8	1,2	6,2	11,7	40,4	620	351	1,13	2,12	34,5	7597	654
T1	7	16,8	1,6	6,3	10,8	49,8	494	477	1,06	2,54	44,5	6554	797
T2	4	16,9	1,4	6,4	23,6	53,1	453	517	1,22	2,80	37,2	5141	675
T3	1	22,7	1,7	6,5	21,6	54,6	353	607	1,90	2,92	46,4	7931	830
T4	1	20,4	1,9	6,3	26,2	57,2	402	562	0,90	2,58	48,5	5403	875
PI	4	26,3	2,2	6,2	13,5	63,0	337	618	1,25	3,34	71,3	7920	1121
RSA	36	15,9	1,5	6,4	12,9	46,3	510	462	1,04	1,91	35,5	5646	628
RSH	21	19,9	1,7	6,3	16,1	52,3	451	514	1,29	2,73	47,2	7019	824

COT, carbono orgánico total; Nt, N total del suelo; Pe, fósforo extraíble; AS, almacenamiento de agua del suelo a la siembra del cultivo; COPg, carbono orgánico particulado grueso (> a 100 µm); COPf, carbono orgánico particulado fino (53 a 100 µm); Npm, N potencialmente mineralizable medido por incubación anaeróbica; CHt, carbohidratos totales; CHs, carbohidratos solubles; N-MOP, N en la materia orgánica particulada (> a 100 µm).

fracciones orgánicas como factores principales. Debido a que estos suelos son más fértiles y poseen mayores concentraciones de todas estas fracciones orgánicas (Tabla 3), el rendimiento de trigo estuvo más asociado al Pe principalmente. Li *et al.* (2013), concluyeron que todos los factores que regulan el agua, los nutrientes y la absorción de nutrientes por el cultivo, son importantes indicadores de la calidad de suelos. En este caso, el pH hallado en CP3 cumpliría esa función con el Pe en el suelo, debido a al efecto regulador que produce el pH sobre la disponibilidad del fósforo para el cultivo (Goh *et al.*, 2013).

Considerando que otros autores (Dalal, 1998; Noellemeyer *et al.*, 2006; Duval *et al.*, 2013) argumentaron que un indicador de calidad debe ser sensible en el tiempo, solamente esta condición la cumplen las fracciones orgánicas más lábiles de C (COPf, CHt, CHs) y N (N-MOP y Npm) en RSA, mientras que sólo el COPg y CHt en RSH. Esto indica que la determinación de esas variables permitiría evaluar la calidad de los suelos de estas regiones porque son indicadores asociados a la producción del trigo. A pesar de que otros autores (Doran & Parkin, 1994; Schoenholtz *et al.*, 2000) demostraron que la condición textural era un indicador de calidad debido a su importancia sobre el transporte de agua y suministro de nutrientes, en este trabajo no se encontró a este factor como indicador asociado al rendimiento.

Los árboles de regresión generados utilizando a los CP con respecto a los rendimientos de trigo demostraron para ambas regiones que la división primaria en umbrales estaba dada en el CP1 (Figura 4), hallando los valores umbrales en los que se maximizaron los rendimientos en ambas regiones (Tabla 5). Para RSA, los CP que maximizaron los rendimientos fue la combinación CP1 principalmente, seguido del CP3 y luego CP2, mientras que en RSH los rendimientos fueron máximos cuando el CP1 tomaba valores > 2,3. Esto demuestra una mayor complejidad en los indicadores que afectan el rendimiento en RSA. Los árboles de regresión múltiple permiten conocer el efecto no aditivo (Balzarini *et al.*, 2008) de las diferentes CP generados sobre el rendimiento del trigo. Esta herramienta multivariada analiza todas las variables regresoras y selecciona, para realizar la partición en diferentes umbrales, las que

Figura 3. Relación entre el rendimiento y el N absorbido en Z90 por la biomasa total aérea.

permiten conformar grupos más homogéneos dentro y más heterogéneos entre ellos (Balzarini *et al.*, 2008). Además, este análisis resulta robusto ante la presencia de outliers, colinealidad, heterocedasticidad o problemas de distribución de los datos (Yohannes & Hoddinott, 1999). Se obtuvieron valores reales de esas nuevas variables generadas (CP) y se conocieron en que situaciones maximizan o minimizan el rendimiento del cultivo.

La utilización del análisis de CP permitió hallar aquellos indicadores de la calidad de los suelos que afectaron los rendimientos de trigo durante 2 años con limitaciones hídricas en suelos de las regiones semiárida y subhúmeda bonaerense. Además, mediante la utilización de los árboles de regresión se pudieron verificar cada una de las nuevas variables generadas (CP) asociada a los indicadores de calidad que maximizaban los rendimientos de trigo, permitiendo obtener datos numéricos de estos CP. Sin embargo, resulta necesaria la realización de estudios complementarios en los cuales se evalúen una mayor cantidad de años con diferencias climáticas que verifiquen estos resultados. Este estudio permite un mayor conocimiento de aquellos indicadores de calidad de suelos que afectan al trigo en estas regiones con años con condiciones hídricas limitantes.

Tabla 4. Análisis de componentes principales con todos los indicadores para rendimiento de trigo.

	Rendimiento de trigo							
	RSA (n=36)				RSH (n=21)			
	CP1	CP2	CP3		CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalores	5,9	2,4	1,4		6,5	2,1	1,5	1,2
Proporción de Varianza	0,46	0,19	0,10		0,50	0,16	0,11	0,10
Varianza acumulada	0,46	0,65	0,75		0,50	0,66	0,77	0,87
Variables	Autovectores				Autovectores			
COT	<u>0,35</u>	0,03	0,005		0,05	0,08	-0,04	0,04
Nt	<u>0,34</u>	0,09	0,30		-0,04	-0,11	-0,27	-0,02
pH	0,26	0,17	-0,36		-0,25	-0,31	<u>0,53</u>	0,41
Pe	-0,05	-0,27	<u>0,46</u>		<u>0,65</u>	-0,35	0,39	-0,15
AS	0,23	-0,37	-0,15		0,06	-0,16	-0,14	-0,17
arena	-0,30	0,34	0,27		-0,19	0,20	-0,18	0,11
limo+arcilla	0,28	-0,35	-0,28		0,19	-0,22	0,19	-0,12
COPg	0,24	0,4	-0,13		0,37	<u>0,48</u>	0,39	-0,04
COPf	<u>0,36</u>	0,21	-0,11		-0,03	0,30	0,08	-0,32
N-MOP	0,13	<u>0,54</u>	0,11		0,31	0,38	0,34	-0,04
Npm	0,23	-0,14	<u>0,49</u>		-0,43	-0,21	-0,25	0,31
CHt	<u>0,34</u>	-0,07	0,12		-0,04	0,20	0,04	<u>0,72</u>
CHs	<u>0,33</u>	0,01	0,32		-0,11	0,13	-0,26	0,18

Subrayados, se indican las variables con mayores autovectores por cada CP generado. COT, carbono orgánico total; Nt, N total del suelo; Pe, fósforo disponible; AS, almacenamiento de agua a la siembra; COPg, carbono orgánico particulado grueso; COPf, carbono orgánico particulado fino; N-MOP, N en la materia orgánica particulada; Npm, N potencialmente mineralizable; CHt, carbohidratos totales; CHs, carbohidratos solubles.

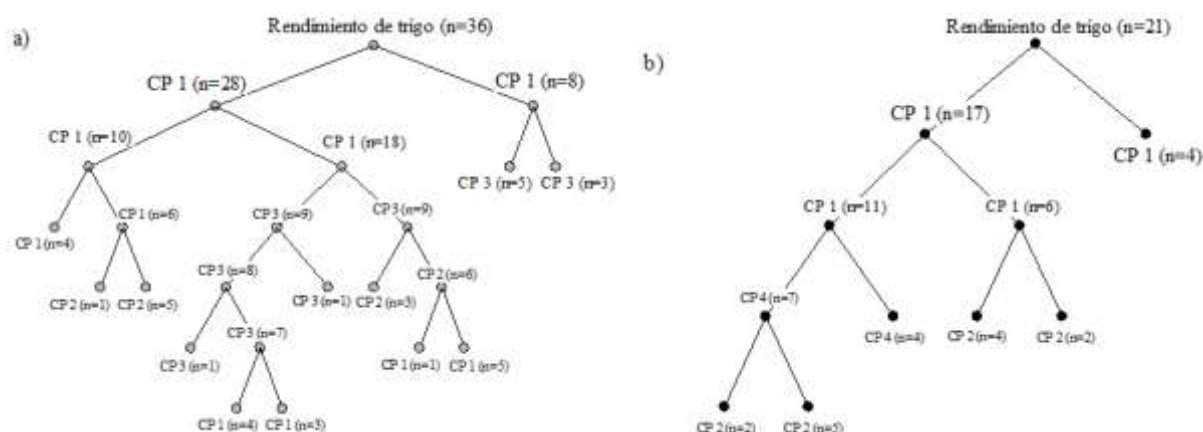
Figura 4. Árboles de regresión múltiple con respecto a los rendimientos en a) RSA y b) RSH.

Tabla 5. Divisiones de los árboles de regresión obtenidos para ambas regiones utilizando a los CP generados como variables regresoras.

Región	Nodo	Formación	<i>n</i>	Rendimiento medio	Mínimo	Máximo
RSA	Datos totales		36	2213	916	3990
	1	CP 1($\leq 1,6$)	28	2398	932	3990
	1,1	CP 1($\leq -1,4$)	10	2030	932	2913
	1.1.1	CP 1($\leq -3,3$)	4	2536	1708	2913
	1.1.2	CP 1($> -3,3$)	6	1692	932	2468
	1.1.2.1	CP 2($\leq -0,3$)	1	2468	2468	2468
	1.1.2.2	CP 2($> -0,3$)	5	1537	932	2140
	1,2	CP 1($> -1,4$)	18	2603	1153	3990
	1.2.1	CP 3($\leq -0,01$)	10	2422	1153	3165
	1.2.1.1	CP 1($\leq -0,2$)	6	2668	2281	3165
	1.2.1.1.1	CP 1($\leq -0,4$)	5	2569	2281	2800
	1.2.1.1.2	CP 1($> -0,4$)	1	3165	3165	3165
	1.2.1.2	CP 1($> -0,2$)	4	2054	1153	2556
	1.2.2	CP 3($> -0,01$)	8	2828	1356	3990
	1.2.2.1	CP 2($\leq -1,4$)	3	3473	3191	3990
	1.2.2.2	CP 2($> -1,4$)	5	2441	1356	3103
	2	CP 1($> 1,6$)	8	1565	916	2319
	2,1	CP 3($\leq 0,8$)	5	1213	916	1471
	2,2	CP 3($> 0,8$)	3	2151	1816	2319
RSH	Datos totales		21	2730	1032	6472
	1	CP 1($\leq 2,3$)	17	2321	1032	3552
	1,1	CP 1($\leq 0,4$)	11	1958	1032	3217
	1.1.1	CP 4($\leq 0,7$)	7	2198	1542	3217
	1.1.1.1	CP 2($\leq -0,6$)	2	3020	2823	3217
	1.1.1.2	CP 2($> -0,6$)	5	1869	1542	2103
	1.1.2	CP 4($> 0,7$)	4	1537	1032	1991
	1,2	CP 1($> 0,4$)	6	2986	1985	3552
	1.2.1	CP 2($\leq -0,2$)	4	3342	3054	3552
	1.2.2	CP 2($> -0,2$)	2	2273	1985	2561
	2	CP 1($> 2,3$)	4	4469	3018	6472

RSA, región semiárida; RSH, región subhúmeda; *n*= número de lotes por CP. Las variables y su importancia dentro de cada componente principal (CP) se detallan en la tabla 4.

Conclusiones

Las fracciones más lábiles del C fueron indicadores de gran importancia en suelos representativos de la RSA por la variabilidad en los aportes de tales fracciones lábiles por los residuos de cultivos. En RSH, la explicación del rendimiento de trigo estuvo mayormente explicada por el Pe y un menor número de variables. Estas diferencias entre ambas regiones, verifica que es necesaria la calibración regional de estos indicadores de calidad asociados a la producción del trigo según las condiciones edáficas en años donde la oferta hídrica no satisface la necesidad del cultivo.

El análisis de CP permitió encontrar indicadores de fertilidad asociados al cultivo de trigo. Mediante la utilización de árboles de regresión múltiple se obtuvieron valores numéricos de esas

nuevas variables generadas (CP) a partir de todos los indicadores que permiten maximizar el rendimiento del trigo.

Existe una falta de información sobre los indicadores de calidad de suelos en estos ambientes bajo SD, donde el cultivo de trigo es uno de los principales cultivos. Sin embargo, estos resultados son una aproximación a la evaluación de la calidad de estos suelos de estos ambientes. Sin embargo, demuestra la necesidad de complementar la información variables meteorológicas de gran importancia sobre los rendimientos. Además, sería importante incluir estos indicadores hallados en la confección de índices funcionales del sistema que permitan explicar en mayor medida la variabilidad de los factores estudiados.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los productores de la Regional Bahía Blanca de AAPRESID, por ceder sus establecimientos para la realización de los ensayos y a Profertil Nutrientes por financiar estos estudios.

Bibliografía

- BALZARINI MG, GONZÁLEZ L, TABLADA M, CASANOVES F, DI RIENZO JA, ROBLEDO CW (2008) Infostat: Manual del Usuario. Córdoba. Editorial Brujas.
- BOLINDER MA, ANGERS DA, GREGORICH EG, CARTER MR (1999) The response of soil quality indicators to conservation management. *Canadian Journal of Soil Science*, 79:37-45.
- BRAY R, KURTZ L (1945) Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59:39-45.
- BREDJA JJ, MOORMAN TB, KARLEN DL, DAO TH (2000) Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. *Soil Science Society of America Journal*, 64:2115-2124.
- BREMNER JM (1996) Nitrogen- Total. En: Sparks, DL (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods*. Wisconsin USA. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America y Crop Science Society of America. p. 1085-1121.
- BREMMER AE, MULVANEY CS (1982) Total nitrogen. En: Page, C *et al.* (Eds.) *Methods of soil analysis, Part 2*. Pp. 595-624. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America Journal. p. 595-624.
- DALAL RC (1998) Soil microbial biomass-what do the numbers really mean?. *Animal Production Science*, 38:649-665.
- DI RIENZO JA, CASANOVES F, BALZARINI MG, GONZALEZ L, TABLADA M, ROBLEDO CW (2013) InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- DORAN JW, PARKIN BT (1994) Defining and assessing soil quality. En: Doran, JW *et al.* (Eds.) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Wisconsin USA. Soil Science Society of America. p. 3-21.
- DUBOIS M, GILLES KA, HAMILTON JK, REBERS PA, SMITH F (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal of Chemistry*, 28:350-356.
- DUVAL ME, GALANTINI JA, IGLESIAS JO, CANELO S, MARTINEZ JM, WALL L (2013) Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*, 131:11-19.
- ELLIOTT ET, CAMBARDELLA CA (1991) Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 34:407-419.
- FABRIZZI K, MORÓN A, GARCIA F (2003) Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. Non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 1831-1841.
- GALANTINI JA (2005) Separación y análisis de las fracciones orgánicas. En: Marban, L *et al.* (Eds.) *Información y Tecnología en los Laboratorios de Suelos para el Desarrollo Agropecuario Sostenible*. Buenos Aires Argentina. Asociación Argentina de Ciencia del Suelo. p. 103-114.
- GALANTINI JA, FERNÁNDEZ R, MINOLDO G, LANDRISCINI MR, KIESSLING R, ROSELL R (2004) Fertilización del trigo con N y S en suelos bajo siembra directa del S y SO Bonaerense. *Actas VI Congreso Nacional de Trigo*. Bahía Blanca Argentina.
- GOH TB, KARAMANOS RE, LEE J (2013): Effects of Phosphorus Form on Short- Term Solubility and Availability in Soils, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44:136-144
- GOVAERTS B, SAYRE KD, DECKERS J (2006) A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87:163-174.
- GREGORICH EG, CARTER MR, ANGERS DA, MONREAL CM, ELLERT BH. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 75:367-385.
- KARLEN DL, MAUSBACH MJ, DORAN JW, CLINE RG, HARRIS RF, SCHUMAN GE (1997) Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 4-10.
- LANDRISCINI MR, MARTÍNEZ JM, GALANTINI JA (2015) Fertilización foliar con nitrógeno en trigo en el sudoeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 33: en prensa.
- LI P, ZHANG T, WANG X, YU D (2013) Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil and Tillage Research* 126:112-118.
- MARTÍNEZ JM, GALANTINI JA, LANDRISCINI MR (2015a). Diagnóstico de fertilidad nitrogenada en el sudoeste bonaerense mediante el uso de un clorofilómetro en trigo. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 33 (1):31-43.
- MARTÍNEZ JM, GALANTINI JA, LANDRISCINI MR (2015b) Eficiencia en el uso del nitrógeno del trigo en la región semiárida de Buenos Aires (Argentina): efectos de la dosis y momento de aplicación. *Agriscientia*, 32:15-28.
- MARTÍNEZ JM; LANDRISCINI MR, GALANTINI JA; DUVAL M, CERDA CC (2012) Predicción del rendimiento en trigo mediante la utilización del índice de verdor. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Trabajo completo en CD-ROM. 16 al 20 de abril. Mar del Plata, Argentina.
- MCDONALD GK (1989) The contribution of nitrogen fertilizer to the nitrogen nutrition of rainfed wheat crops in Australia: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 29: 455-481.
- NOELLEMEYER E, QUIROGA A, ESTELRICH D (2006) Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 65:142-155.
- PAOLONI JD, VAZQUEZ R (1985) Necesidades teóricas de los cereales de invierno y probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones como base para el balance hídrico. *Anales de Edafología Agrobiológica*, XLIV:1545-1556.
- PARR JF, PAPENDICK RI, HORNICK SB, YOUN RE (1992) Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7:5-16.
- PUGET P, ANGERS DA, CHENU C (1999) Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 31:55-63.
- REEVES DW (1997) The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 43(1):131-167.
- RON M, LOEWY T (1990) Fertilización fosfórica en trigo en el sudoeste bonaerense. I Modelo de respuesta. *Ciencia del Suelo*, 8(2):187-194.
- SAINZ ROZAS H, ECHEVERRIA HE, ANGELINI H (2011) Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo*, 29: 29-37.
- SCHOENHOLTZ SH, MIEGROET HV, BURGER JA (2000) A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138:335-356.
- SHUKLA MK, LAL R, EBINGER M (2005) Soil quality indicators for reclaimed mine soils in southeastern Ohio. *Soil Science*, 169:133-142.
- TOLEDO DM, GALANTINI JA, FERRECCIO E, ARZUAGAS, GIMENEZ L, VAZQUEZ S (2013) Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ciencia del Suelo*, 31:201-212.
- WANG W, SMITH CJ, CHALK PM, CHEN D (2001) Evaluating chemical and physical indices of nitrogen mineralization capacity with an unequivocal reference. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), 368-376.

37. **WARING SA, BREMNER JM** (1964) Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*, 201: 951-952.
38. **WILLSON TC, PAUL EA, HARWOOD RR** (2001) Biologically active soil organic matter fractions in sustainable cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 16: 63-76.
39. **YOHANNES Y, HODDINOTT J** (1999) Classification and regression trees: An introduction. Technical Guide 3. Washington USA. International Food Policy Research Institute, p. 26.
40. **ZADOKS JC, CHANG TT, KONZAK CF** (1974) A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14:415-421.